

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 09-167869

(43)Date of publication of application : 24.06.1997

(51)Int.Cl. H01S 3/098

(21)Application number : 08-235356 (71)Applicant : IMRA AMERICA INC

(22)Date of filing : 05.09.1996 (72)Inventor : FERMANN MARTIN E
HARTER DONALD J

(30)Priority

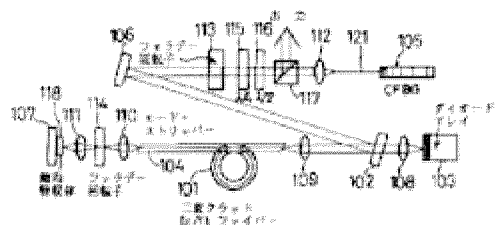
Priority number : 95 523808 Priority date : 05.09.1995 Priority country : US

(54) MODE-LOCKED LASER DEVICE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To enable a mode-locked double clad fiber laser excited by a wide band diode laser array to generate pulses of the order of picoseconds or femtoseconds.

SOLUTION: 560fsec pulses of maximum power 40pJ and wavelength 1560nm are generated by an Er/Yb fiber oscillator 101. 170fsec pulses of 50pJ can be generated in a cavity which is compensated for dispersion. A negative chirp fiber Bragg grating 105 is added so as to improve a cavity in dispersion controllability, whereby pulses of maximum power 1nJ and width 3psec can be generated. A saturated absorber 118 is used to make an oscillator start generating pulses, and a nonlinear polarization development is used for shaping pulses in a normal state.



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平9-167869

(43)公開日 平成9年(1997)6月24日

(51) Int.Cl.⁸
H 0 1 S 3/098

蔵別記号 庁内整理番号

F I
H O I S 3/098

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数25 O.L (全 13 頁)

(21)出願番号	特願平8-235356
(22)出願日	平成8年(1996)9月5日
(31)優先権主張番号	08/523808
(32)優先日	1995年9月5日
(33)優先権主張国	米国(US)

(71)出願人 593185670
イムラ アメリカ インコーポレイテッド
アメリカ合衆国 ミシガン州48105 アン
アーバー ウッドリッジ・アベニュー1044

(72)発明者 マーチン・イー・ファーマン
アメリカ合衆国 ミシガン州48105 アン
アーバー レイバイン・コート4931

(72)発明者 ドナルド・ジェイ・ハーター
アメリカ合衆国 ミシガン州48105 アン
アーバー サルグレイブ・プレイス3535

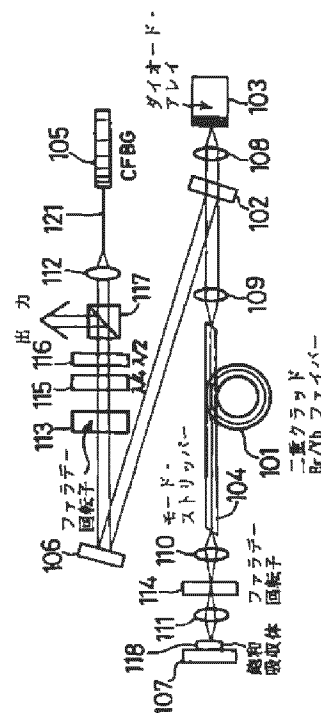
(74)代理人 弁理士 大川 宏

(54) 【発明の名称】 モードロック・レーザー装置

(57) 【要約】

【課題】 広帯域ダイオード・レーザ・アレイで励起されたモードロック二重クラッド・ファイバー・レーザから、ピコ秒台やフェムト秒台のパルスを発生する技術を提供すること。

【解決手段】 Er/Ybファイバー発振器101によって、最高40 pJの560 fsecパルスを1560 nmの波長で発生する。分散が補償されたキャビティでは、50 pJの170 fsecパルスを発生することができる。キャビティ内の分散制御性を高めるために陰性チャープ・ファイバー・ブラッグ格子105を付加することによって、最高1 nJの3 psecパルス幅のパルスが発生する。パルス発生を開始させるために飽和吸収体118が使用され、定常状態のパルス整形には非線形の偏光展開が利用されている。



【特許請求の範囲】

【請求項1】キャビティ内に配置され、利得媒体として作用し、 100 psec 以下のパルス・レーザー・エネルギーを発生し得る二重クラッド・ファイバーと、該二重クラッド・ファイバーの一端に結合され、該二重クラッド・ファイバーにポンプ光を供給するダイオード・レーザー・アレイと、

該キャビティ内に配置され、前記二重クラッド・ファイバーを通過する光軸に沿ってエネルギーを反射させる反射体と、

該キャビティ内で発生されたレーザーエネルギーを受け取り、該レーザーエネルギーの一部を出力するための出力手段と、

該キャビティ内に短パルスの発生を開始させるためのモードロック開始手段と、

前記二重クラッド・ファイバー内でクラッド・モードを抑制するクラッド・モード抑制手段と、

前記キャビティ内での分散を制御する分散制御手段と、を備えているモードロック・レーザー装置。

【請求項2】前記モードロック開始手段は、半導体飽和吸収体を含む、請求項1記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項3】前記半導体飽和吸収体は、前記キャビティの一端に配置され、レーザーエネルギーの一部を出力するために部分的な反射性を有する、請求項2記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項4】前記キャビティに含まれるファイバーは 5×10^{-7} 以下の複屈折特性を有し、前記半導体飽和吸収体のキャリア寿命は 100 psec 未満である、請求項2記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項5】前記モードロック開始手段は、音響光学変調素子または電子光学変調素子であり、外部の光学パルス源により振幅変調または相位変調を引き起こす、請求項1記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項6】さらに、前記二重クラッド・ファイバー内の線形の位相変動を補償するための位相変動補償手段を備えている、請求項1記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項7】非線形の偏光展開によって引き起こされる非線形のパルス整形を安定化させるために、前記二重クラッド・ファイバーは 1×10^{-7} よりも大きい複屈折特性を有する、請求項6記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項8】さらに、前記二重クラッド・ファイバーの二つの偏光固有モードの間での線形の位相遅れを制御するために、 $1/4$ 波長板および $1/2$ 波長板が使用されている、請求項7記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項9】前記位相変動補償手段は、さらに、前記キャビティの一端側に配置された第一ファラデー回転子と、

該キャビティの他端側に配置された第二ファラデー回転子と、

該第一ファラデー回転子と該キャビティの該一端の間に配置された偏光子と、を備えている、請求項6記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項10】前記二重クラッド・ファイバーの二つの偏光固有モードの間における線形の位相遅れを制御するために、 $1/4$ 波長板および $1/2$ 波長板をさらに備えている、請求項9記載のモードロック・レーザー装置。

10 【請求項11】前記偏光子と前記キャビティの一端との間に、出力結合を調整するための $1/2$ 波長板を備えている、請求項9記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項12】前記線形相位変動補償手段は、さらに、前記キャビティの一端側に配置された第一ファラデー回転子と、

該キャビティの他端側に配置されたファラデー回転子鏡と、

該第一ファラデー回転子と該キャビティの一端との間に配置されている偏光子と、を備えている、請求項6記載のモードロック・レーザー装置。

20 【請求項13】さらに、 1×10^{-7} 未満の複屈折特性を有し、前記ファラデー回転子鏡の前に配置された低複屈折ファイバーを備えている、請求項12記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項14】前記分散制御手段は、分散補償ファイバーである、請求項1記載のモードロック・レーザー装置。

30 【請求項15】前記分散補償ファイバーは、前記キャビティの一端で接続されている、請求項14記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項16】前記分散制御手段は、チャープ・ファイバー・ブラッグ格子である、請求項1記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項17】前記チャープ・ファイバー・ブラッグ格子は前記二重クラッド・ファイバーに直接形成され、前記二重クラッド・ファイバーは前記チャープ・ファイバー・ブラッグ格子を通じて励起されるようになっている、請求項16記載のモードロック・レーザー装置。

40 【請求項18】前記チャープ・ファイバー・ブラッグ格子は前記キャビティの一端で接続されている、請求項16記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項19】さらに、前記キャビティ内に配置された第二のチャープ・ファイバー・ブラッグ格子を備えている、請求項16記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項20】前記二重クラッド・ファイバーは、希土物質がドーピングされたガラスファイバーである、請求項1記載のモードロック・レーザー装置。

50 【請求項21】前記出力手段は、出力結合に使用されるファイバー・カップラーである、請求項1記載のモードロック・レーザー装置。

3

【請求項22】前記キャビティ内に、さらに、 5×10^{-2} より大きな線形複屈折を有し、二つの偏光軸を備えた偏光保持ファイバーと、前記偏光保持ファイバーの一方の偏光軸に対して偏光軸が調整された偏光子と、を備えている、請求項1記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項23】前記キャビティはリング・キャビティであり、該リングキャビティ内に単一モードファイバーおよびモードロック機構を備えている、請求項1記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項24】前記二重クラッド・ファイバー内の線形の位相変動を補償するためのファラデー回転子鏡と、該ファラデー回転子鏡により引き起こされる 90° の偏光回転のずれを補償するための偏光子および $1/2$ 波長板と、をさらに備えている、請求項1記載のモードロック・レーザー装置。

【請求項25】前記出力の出力波長を調整するためのチューニング機構を備え、該チューニング機構は、エタロン、光学フィルター、複屈折チューニング板およびバルク格子のうち少なくとも一つを備えている、請求項1記載のモードロック・レーザー装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明はフェムト秒およびピコ秒台のパルスを発生するためのモードロック・ファイバー・レーザー装置（以下、「レーザー装置」を「レーザー」と略記）に関し、さらに詳しくは、ダイオード・レーザー・アレイでエネルギー供給（ポンピング）された二重クラッド・ファイバー（double-clad fibers）を雇用したモードロックファイバー・レーザーに関するものである。すなわち本発明は、モードロック・レーザーの技術分野に属する。

【0002】

【従来の技術】モードロック・ファイバー・レーザーは通常、フェムト秒（fsec）およびピコ秒（psec）パルスの小型発生源の最有力候補とされている。しかし、ファイバー・レーザー技術に基づく超高速技術の商業的成功は、代替技術に対して低コストでかつ簡素なレーザーシステムが設計されないかぎり難しい。このため、動作中に高価な変調装置を必要としない受動的モードロックファイバー・レーザーは大変魅力的である。

【0003】受動的にモードロックされたファイバー・レーザーは、M. E. Fermann, M. Hoffer, F. Haberl, A. J. Schmidt, L. Turi著による『Additive-pulse compression mode locking of a neodymium fiber laser』、Optics Letters, Vol. 16, No. 4 (1991)に初めて報告された。以来、商業的使用への可能性が高い二種類のフェムト秒パ

4

ルスを発生し得る受動的モードロックファイバー・レーザーシステムが開発されている。本明細書においては、M. E. Fermann, L. M. Yang, M. L. Stock and M. J. Andrejco著による『Environmentally stable Kerr-type mode-locked erbium fiber laser producing 360-fs pulses』、Optics Letters, Vol. 19, No. 1 (1994)に開示されたシステムを、第一システムと称することにする。また、E. A. DeSouza他著による『Saturable Absorber Modelocked Polarization Maintaining Erbium-doped Fibre Laser』、Electronics Letters, Vol. 29, No. 5 (1993)に開示されたシステムを、第二システムと称することにする。

【0004】この他に、ピコ秒パルスを発生し得るレーザーとして、商業的使用に適した二つのシステムが開発されている。本明細書においては、M. E. Fermann, K. Sugden, I. Bennion著による『High-power soliton fiber laser based on pulsed width control with chirped fiber Bragg gratings』、Optics Letters, Vol. 20, No. 2 (1995)に開示されたシステムを、第三システムと称することにする。また、B. C. Barnett他著による『High-power erbium-doped fiber laser mode locked by a semiconductor saturable absorber』、Optics Letters, Vol. 20, No. 5 (1995)に開示されたシステムを、第四システムと称することにする。

【0005】第二および第四システムの場合、モードロックの開始と定常状態のパルス整形には飽和吸収体（saturable absorber）が必要とされる。対照的に、第一および第三システムの場合は、モードロックの開始時のみに飽和吸収体を使用され、定常状態のパルス整形はファイバー内における非線形の偏光発生（nonlinear polarization evolution）によって達成されている。さらに有利なことに、第一および第三システムには二つのファラデー回転子を使用した補償技術が含まれており、線形および非線形の偏光変動が強く抑制される。

【0006】一方、ピコ秒の範囲において、第三システムでは、チャープ・ファイバー・ブラッグ格子を用いてキャビティ内の分散を変化させるだけでパルス幅を広

範囲にわたり調整できるようになる。M. C. Farrelles, K. Sugden, D. C. J. Reid, I. Bennion, A. Maony, M. J. Goodwin著による『Very broad reflection bandwidth (44nm) chirped fibre ratings and narrow bandpass filters produced by the use of an amplitude mask』、Electronics Letters, Vol. 30, No. 11 (1994) を参照されたい。

【0007】これらのシステムは実験室内では完全な動作を達成しているが、これらのシステムにはイオン、固体レーザー、主発振出力増幅レーザーダイオード、または、大出力ピグテール・ダイオード・レーザー等の高価なポンプ源が必要になるため、これらのシステムに対する商業的関心は未だに薄い。対照的に、ほぼ同等のパルス幅を発生し得る受動的にモードロックされた固体レーザーは、低価格で広帯域のマルチストライプ・ダイオード・レーザー・アレイをポンプ源として使用し得る。一例として、K. J. Weingarten, U. Keller, T. H. Chiu, J. F. Ferguson著による『Passively mode-locked diode-pumped solid-state lasers that use an antiresonant Fabry-Perot saturable absorber』、Optics Letters Vol. 18, No. 8 (1993) およびD. Kopf, K. J. Weingarten, L. R. Brovelli, M. Kamp and U. Keller著による『Diode-pumped 10-fs passively mode-locked Cr:LiSAF laser with an antiresonant Fabry-Perot saturable absorber』、Optics Letters, Vol. 9, No. 24 (1994) を参照されたい。受動的にモードロックされた固定レーザーは、ダイオード・レーザー・アレイによるポンピングが可能のため、大型であるにも関わらず非常に魅力的である。

【0008】コストを最低限に抑えるためにモードロックされたファイバー・レーザーには、ダイオード・レーザー・アレイを使用し得る。実際に、ファイバーを二重クラッド構造に設計すれば、連続波型ファイバー・レーザーをダイオード・レーザー・アレイによりポンピングし得るということはかなり以前より知られていた。一例として、Snitzer他による米国特許第4,815,079号明細書を参照されたい。Snitzer他の米国特許によれば、ファイバーは二重のクラッドを持つように設計されており、外側クラッドは低い屈折率

を、内側クラッドは非常に高い屈折率を有し、内側クラッドによる光捕捉のための典型的な開口数は0.20と0.60の間であった。内側のクラッド内には、さらに高い屈折率を有するファイバー・コアが内側クラッドの中心からかなり偏った位置に配設されていた。

【0009】Snitzer他の米国特許には、別の実施例として内側クラッドが長方形に近い形のものも開示している。これら二つのデザインにより、内側のクラッド内に放出された光がファイバー・コアとできる限り多く交差し、希土類の利得物質でドーパ処理されたコアに光が最も効率的に吸収され得る。また、ファイバー・コアは単一モードになるように設計されており、この結果、ファイバーが共振器内に配置されると単一モードのレーザー信号出力を得ることができる。なお、最近になって、軸対称 (centro-symmetric) ファイバー構造を有する二重クラッド・ファイバー (即ち内側クラッドの中心にファイバー・コアが配置されたファイバー) から完全に意にかなう成果が達成されたことにも注目されたい。この点については、H. Zelmer, U. Williamkowski, A. Tunnerman, H. Welling著による『High-power cw neodymium-doped double-clad fiber lasers』、CLEO 95, paper CMB4を参照されたい。このような励起技術は、Maurerに賦与された米国特許第3,808,549号明細書に開示されているように、以前から予言されていた。この結果、ファイバー構造は、アクリレート・コーティング (acrylate coatings) の出現以前にファイバー実用化のための事実上の業界標準だった低屈折率コーティング (シリコンゴム等) を用いた標準的な単一モードファイバーの構造で実施し得ることになった。

【0010】最近になって、受動的なモードロックは、マルチ・ストライプ・ダイオード・レーザー・アレイによってクラッドが励起された軸対称二重クラッド・ネオジム・コーティング処理ファイバー内で達成されている。一例として、M. Minden他著による『Long-pulse coherent waveforms from a fiber laser』、CLEO 95, paper CTuR2を参照されたい。具体的には、発生されるパルスの帯域幅を限定するために非チャープ (uncharp) の狭帯域幅ファイバー格子が使用され、パルス発生の開始と定常状態のパルス整形のために飽和吸収体を使用された。しかし、キャビティー内での線形および非線形の偏光変動を補償するための技術は使用されておらず、また、発生させることができたパルス幅は全て500 psec程度またはそれ以上であった。さらに、キャビティー内での分散の制御手段やクラディング・モード (cladding mode) を抑制する手段などが含まれていなかった。

それゆえに、従来技術ではフェムト秒またはピコ秒台のパルスを発生するクラッドポンプ式ファイバー・レーザーを設計することは不可能であった。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的は、広帯域ダイオード・アレイによってポンピングされた二重クラッド・ファイバー・レーザーからフェムト秒およびピコ秒台のパルスを発生させるモードロック・レーザー装置を提供することである。

【0012】

【課題を解決するための手段およびその作用・効果】本発明のモードロック・レーザー装置では、二重クラッド・ファイバーを使用することにより、高出力なファイバー発振器を構築するオプションを堅持しながらファイバー・コアとポンプ出力の結合(coupling)を簡素化できる。ここに公開され、特許請求の範囲に記載された新システムは、二重クラッド・ファイバーの線形の複屈折特性を補償し、そのことによりファイバー内の線形および非線形の偏光変動を補償し得る。

【0013】我々の実験結果は、モード・ストリッパー(mode-strippers)が使用された場合でも、ファイバー内の被きょう導クラッド・モード(guided cladding modes)が純粋な受動的カー型モードロック(飽和吸収体を使用しない場合の受動的なモードロック)を妨げることが示している。本発明の好ましい実施例には、モード・ストリッパーを含む場合の最適位置が開示されている。キャビティー内に適量の分散を使用し、さらに、非線形の偏光展開(polarization evolution)により引き起こされるパルス整形と飽和吸収体を使用することによって、本発明の発振器はフェムト秒台およびピコ秒台のソリトンパルスを確実に発振させ得る。本発明の実施例には、能動的にモードロックされたファイバー・レーザーやファイバーリング・レーザー、および、より一般的なキャビティー構造が含まれ得る。

【0014】

【発明の実施の形態】本発明のモードロック・レーザー装置の実施の形態については、当業者に実施可能な理解がえられるよう、以下の実施例で明確かつ十分に説明する。

【実施例1】

(実施例1の構成および作用効果)図1は、本発明の実施例1のフェムト秒またはピコ秒台のパルスを発生するクラッドポンプ式受動的モードロックファイバー発振器を描いたものである。実施例1のシステムでは、利得ファイバーの分散を補償する試みはされていない。分散補償式のキャビティーは、図4を参照して後程詳しく説明する。図1の構造では、 Er^{3+} でコーティングされ、 Yb^{3+} で増感された一本のファイバー101が利得媒体として使用され、 Yb^{3+} からのエネルギー転送を通じて

Er^{3+} を励起させることを可能にしている。この点に関しては、J. D. Minelly他著によるIEEE Photonics Technology Letters, [Diode-Array Pumping of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-doped Fiber Lasers and Amplifiers], Vol. 5, No. 3 (1993)を参照されたい。

【0015】好ましいファイバー101の一つは、ホスホケイ酸アルミニウムのガラスホスト内に Er^{3+} を800ppm、 Yb^{3+} 8000ppmのレベルでドーピングさせたものである。ファイバー101のコア直径は6 μm であり、その開口数は0.16である。また、内側クラッドの直径は100 μm でシリコンゴムでコーティングがされており、有効開口数(effective numerical aperture)は0.4である。このファイバー101では、ファイバー・コアがファイバー101の中心部に配置されているため、二重クラッド・ファイバー101を低損失で接続し得る。ファイバー101を直径3.5cmのドラムに巻き付けることによりポンプレーザーからのスキュー光線(skew rays)を効率的に吸収することができ、この結果、発振器内のファイバー長を7.7mまで短縮し得る。ここで、本発明の発明者らは利得ファイバーの長さが5~10mの間で良い性能が得られることを実験的に発見した。ファイバー・コアの扁平率が小さいということ、および、発生過程で生じたファイバー・コアとクラッド間の残留ストレスのため、このようなファイバーから $\Delta n \approx 1.5 \times 10^{-6}$ の複屈折特性が得られることが発見された。この複屈折特性のため、1.56 μm の信号波長では約10cm程度のうなり波長(beat length)が生じる。

【0016】引き続き図1を参照すると、ファイバー101は、976nmの波長で動作する標準出力1W、100 \times 1 μm の広帯域ダイオード・レーザー・アレイ103によって、レンズ108および109、および二色鏡102を通してポンピングされる。二色鏡102は、例えば、ポンプ光の送信を可能にするために976nmの波長で80%を越える光を透過させることができ、ファイバー101から放射される信号光および鏡106から反射した信号光を反射するために、1.56 μm の信号波長で98%以上の反射率を有するものとなり得る。倍率が1の映像システム(即ちレンズ108と109)を使用することにより、アクティブ・ファイバー101の内側クラッドへ最高60%の結合率(coupling efficiency)が得られる。鏡102および106の曲率とレンズ108および109の焦点距離は、ダイオード・アレイ103から二重クラッド・ファイバー101へのポンプ光の結合が最適になるように選択されている。

【0017】図1に示すとおり、シリコンゴムのコーティングをアクリラートまたは内側クラッドよりも高い屈折率を有する液体に置換することにより、モード・ストリッパ104がファイバー101の一端に形成されている。モード・ストリッパ104は発振器内のクラッド・モードを強く減衰させる。ダイオード・レーザー・アレイ103へのフィードバックを防ぎ、また二重クラッド・ファイバー101への不必要なフィードバックを削減するために、二重クラッド・ファイバー101の両端部は約 10° の角度で裂かれている。

【0018】チャープ・ファイバー・ブラッグ格子105は、図1のキャビティの一端に配置されている。レンズ112の焦点距離は、チャープ・ファイバー・ブラッグ格子105へ入射する信号光の結合が最適になるように選択されている。なお、チャープ・ファイバー・ブラッグ格子105の代わりに、鏡（図示せず）を使用することもできる。この場合、鏡の曲率はレンズ112の焦点距離と共に、鏡から反射した信号光が二重クラッド・ファイバー101のコアへ最適に入射するように選択される。

【0019】図1に示した実施例1のモードロック・レーザー装置では、ファイバー・キャビティ内における線形の偏光変動を補償するために、キャビティ内に二つのファラデー回転子113および114が挿入されている。また、ファイバー101は低複屈折特性であるにも関わらず、ファイバー101が一度コイル状態にされると、環境変化の影響により発生する非線形の偏光変化がファイバー101内で減少することが発見された。これらのことから、環境的に安定したキャビティを維持しつつ、定常状態のモードロック機構（第一システムを参照）として非線形の偏光展開を使用することが可能になった。実施例1のモードロック・レーザー装置の通り、 $1/4$ 波長板115および $1/2$ 波長板116を図のように配置し、さらに $1/4$ 波長板115および $1/2$ 波長板116を適切な角度へ回転させることにより、ファイバーの二つの偏光固有モードの間に必要な位相バイアスが達成される。

【0020】チャープ・ファイバー・ブラッグ格子105を使用しない場合には、キャビティの分散はファイバーの分散によって支配され、分散は $D2 \approx 0.2 \text{ ps}^2/\text{cm}$ と推定される。すなわち、ファイバーはソリトン・サポート（soliton supporting）である。キャビティ内の分散を減少させるには、図1のように5mmの長さの陰性チャープ・ファイバー・ブラッグ格子105を挿入すればよい。好ましいチャープ・ファイバー・ブラッグ格子105は、約17nm程度の帯域幅で、約 $1.56 \mu\text{m}$ 程度の中心を有し、 $-3.40 \text{ ps}^2/\text{cm}$ の分散と約90%のピーク反射率を有する。キャビティ内の偏光子117によって拒絶された光は信号出力として使用し得る。図示していないが、回

転可能な $1/4$ 波長板を、偏光子117とチャープ・ファイバー・ブラッグ格子105（または鏡）との間に挿入することにより、図1とは反対方向へ結合する出力を得ることもできる。この場合、出力を調整可能にし得る。

【0021】チャープ・ファイバー・ブラッグ格子105を使用せず、代わりに鏡を使用する場合、ファイバー・レーザーは最高60mWの連続波出力を発生することが発見された。ここでファイバーよりの出力の回折がほとんど（99%以上）制限されていた。しかし、二重クラッド構造の場合、クラッド・モードが完全に抑制されることは通常あり得ない。これは、モード・ストリッパ104が存在する場合でも同様である。さらに、ファイバー・コアから分散された光は、ファイバーの不均一性とファイバー101に強くかけられた屈曲のためにクラッドに捕捉され、ファイバー出力地点にてかなり低いレベルの非干渉性のバックグラウンド光（incoherent background）へと変化する。しかし、ファイバーの断絶点（即ちファイバーの継ぎ目等）において $1/N$ （Nはクラッド内のモードの総数）に比例するバックグラウンド光の一部が、基本モードに再結合し得る。

【0022】低レベルの非干渉性のバックグラウンド光は、レーザーの連続波発振のための強い注入信号となるため、通常、このような状況においてのモードロックの開始は難しいとされている（H. A. Haus and E. P. Ippen, Optics letter s, Vol. 16, p. 1331 (1991)を参照されたい）。実際に発明者らは、キャビティ内に挿入された鏡の一枚を振動させることによって、キャビティ内にカー型モードロックを開始させようと試みたが、その試みは全て失敗に終わった。

【0023】本発明においては、図1に示したように、キャビティの一端に飽和吸収体118を配置することによってモードロックを開始させ得る。飽和吸収体118は、後述の実施例2および実施例4に示すようにInGaAsPを基にしたものでもよい（H. Lin他著、CLEO 95, Paper JTuE1を参照されたい）。飽和吸収体のキャリア寿命を減少させるために、放射能処理が必要になる。発明者らは、最適な飽和吸収体のキャリア寿命は一般的に、キャビティ内でのレーザーの往復時間の約 $1/10$ であるということを見出した。

【0024】信号光を飽和吸収体118に集中させるために、レンズ110および111を使用し得る。このシステムの場合、飽和吸収体118上に集光された信号光のスポットの直径は、 $2 \sim 30 \mu\text{m}$ の間が好ましい。飽和吸収体118が存在する場合、レーザーは偏光状態の影響を受ける（即ち、 $1/4$ 波長板115および $1/2$ 波長板116の設定の影響を受ける）が、モードロック

動作を確実に自己開始 (self-starting) する。これは、飽和吸収体118がモードロック開始過程の起動特性を支配しており、非線形の偏光展開が定常状態におけるパルス整形を顕著に支配していることを示している。ここで、非線形の偏光展開および飽和吸収体118がパルス発生過程で大きな役目を果たしていることに注目されたい。

【0025】飽和吸収体118上に集光された信号光のスポットの直径を縮小することにより、システムの偏光感度を減少させることもできる。しかし、これは飽和吸収体118の崩壊閾値 (damage threshold) を低下させる副作用をもたらす。それゆえに、ある特定のシステムにおいて偏光感度と崩壊閾値のどちらを重要と考えるかにより、飽和吸収体118上に集光された信号光のスポットの直径は2~30 μ mの範囲のどこかで最適になり得る。

【0026】同様に、ファラデー回転子113および114を取り除くと、レーザーの安定性が著しく失われる。これは、ファイバー101が高い複屈折特性を持っているため、非線形の偏光展開による安定したパルス整形を妨げるからである。この場合に発生され得る定常パルスは数十ピコ秒台のパルス幅を有する。これはパルスが主に飽和吸収体118によって整形され、非線形の偏光展開の影響はほとんど無いことを示す。

【0027】図2(a)には、図1に示した実施例1のモードロック・レーザー装置からチャープ・ファイバー・ブラッグ格子105を取り除いたキャビティによって整形されたパルスの自己相関軌跡が描かれ、図2

(b)には図2(a)に相当するスペクトルが描かれている。パルス波形がsech²形であると仮定すると、パルス幅は560fsで時間-帯域幅の積は0.32である。パルスのエネルギーは40pJである。反復率13MHzにおいて、これは平均出力500 μ Wに相当する。この構造においては、ダイオード・レーザーのポンプ出力が約150mW程度でも、確実な単一パルス動作が達成される。この場合、単一パルス動作のための最安定域は、ポンプ出力を148~151mWの間に設定することによって確保することができる。言い換えると、ポンプ出力は±1%以内に制御されなければならない。

【0028】図3(a)には、チャープ・ファイバー・ブラッグ格子105を使用したキャビティ (即ち図1に示した実施例1の装置) によって発生されたパルスの自己相関軌跡が描かれ、図3(b)には図3(a)に対応するスペクトルが描かれている。パルス波形がsech²形であると仮定すると、パルス幅は3psで、時間-帯域幅の積は0.32である。パルスのエネルギーは1nJである。これは反復率13MHzにおいて平均出力13mWに相当する。この構造においては、ダイオード・レーザーのポンプ出力が約800mW程度で

も、確実な単一パルス動作が達成される。この場合、単一パルス動作を確実にするためには、ポンプ出力は±10%以内 (即ち730~880mW) に制御されなければならない。チャープ・ファイバー・ブラッグ格子105が存在する場合には、モード・ストリッパ104が取り除かれた状態でも、本発明のレーザー装置の動作は十分満足し得るものとなる。これは、チャープ・ファイバー・ブラッグ格子105の前に置かれた単一モードファイバー121が、効率良くモード・ストリッピング (mode-stripping) を行うからである。

【0029】(実施例1の各種変形態様) 実施例1のモードロック・レーザー装置の構造は、フェムト秒台およびピコ秒台のパルスの発生を可能にするキャビティ設計の一例であるが、他の希土類元素がドーピングされた二重クラッド・ファイバーを利得媒体として使用することもでき、この場合でも受動的モードロックによりピコ秒台およびフェムト秒台のパルスを発生させ得る。ソリトン域での動作を確実にするために、陰性のチャープ・ファイバー・ブラッグ格子105を加えてもよい。さらに、波長チューニング素子を偏光子117とレンズ112の間に配置し、レーザーの放射波長を調整することもできる。全く同様に、波長チューニング素子は、本明細書および図面に開示された全ての実施例装置に組み込み得る。波長チューニング素子は、多くの適切なデバイスの中から選択することができるが、その一例としては、エタロン、光学フィルター、複屈折チューニング板、バルク格子などが使用できる。一つ (または複数) の波長チューニング素子と第二 (またはそれ以上) のブラッグ格子とを組み合わせることによって、二つ (またはそれ以上) の異なる波長のパルスを発生させることもできる。図4に、二つのチャープ・ファイバー・ブラッグ格子105および119と、波長チューニング素子120とを組込んだキャビティ設計の一例を示す。なお、波長調節が可能な単一波長レーザーが必要な場合には、二つ目のチャープ・ファイバー・ブラッグ格子を省略し得ることに注意されたい。

【0030】[実施例2] 図5に、本発明の実施例2としてのモードロック・レーザー装置を示す。図5から図11に描かれた要素のうち、前述した実施例1の装置の要素と類似のものには同じ符号を用いた。第5図に示した実施例2の装置では、フェムト秒台のパルスを発生させるために、飽和吸収体118を偏光子117の後方側のキャビティの一端に配置し、また、鏡とファラデー回転子とを一体化したファラデー回転子鏡202をキャビティの他端に配置して、システムの簡素化を図っている。利得媒体 (即ちファイバー101) の帯域幅によって制限が加えられたパルスを得るために、所定長の陰性 (または陽性) 分散クラッド・ポンプ・ファイバー (negative dispersion cladding pumped fiber) とドーピングされ

ていない所定長の陽性（または陰性）標準単一モードファイバー201とを組合わせ、キャビティー内の分散がゼロになっている。この構成では、非複屈折ファイバーがファラデー回転鏡202の直前に配置されるので、キャビティーの環境感度を最小限に抑えることができ、大変有利である。一例として、5mのEr/Ybファイバー101（図1の説明を参照されたい）と0.80mの高陽性分散ファイバー201を使用することによって、キャビティー内の分散をほとんどゼロにすることができる。実施例2の装置では、パルス幅が170fsec程度、パルス・エネルギーが50pJ程度の帯域幅が限定されたガウス形パルス（bandwidth-limited Gaussian-shaped pulses）が得られた。

【0031】[実施例3] 図6には、実施例3としてのモードロック・レーザー装置が示されている。キャビティー内に音響光学的または電気光学的な変調器を加えることによって、能動的にモードロックされたクラッドポンプ式ファイバー・レーザーを構築することが可能となる。図6に示したように、変調器301および302はキャビティーの右端または左端に配置すると良い。システムの大きさを小型に保つためには、ピグテール型ファイバー変調器（fiber pigtailed modulator）をキャビティーの左側のみに挿入することが好ましい。また、鏡303を信号光を部分的に反射するタイプにすれば、鏡303を出力カプラとして使用し、鏡303より出力光が得られる。

【0032】[実施例4] 図7は、実施例4としてのモードロック・レーザー装置を示している。図7に示したように、モードロック・リング・レーザーを構成するために、二重クラッド・ファイバー101はリング・キャビティーの一部となり得る。原理的に、衝突パルス式モードロック動作は、この場合、飽和吸収体118をレンズ110とレンズ111との間に配置することによって達成し得る。しかし、このキャビティー内では線形の偏光変動が補償されていないため、このキャビティーにおける長期安定性（long-term stability）は限定されたものとなる。ただし、このタイプのキャビティーでは、信号光が通過する位置であればリング内のどこにでも変調装置301を配置することができる。全キャビティーを光複屈折ファイバーで構成すれば、リング・キャビティーの環境的安定性はより高いものとなる。偏光子（図示せず）を挿入してファイバーの光軸と偏光子の光軸を調整することにより、より確実に単一の偏光状態でレーザーを発振させ得る。レーザー光の出力を得るには、鏡102および鏡106のうちどちらか一方を部分反射鏡にするか、または、ファイバー201にファイバー・カプラを接続する。

【0033】[実施例5] 次に、実施例5では、二重クラッド・ファイバー101が様々なキャビティー設計に

取り入れられており、二重クラッド・ファイバー101は、キャビティー内の偏光変動を補償するためのファラデー回転鏡と共に、二重バス構造のキャビティーで使用されている。このようなキャビティーの包括的デザインを、図8に示す。鏡102と鏡106との間に配置されたモードロック機構501としては、例えば、全光スイッチ（all-optical switch）、外部の光パルス源により制御される位相変調素子または振幅変調素子、音響光学変調素子または電子光学変調素子、または飽和吸収体を使用し得る。なお、任意長の単一モード・ファイバー（図示せず）が、スプライスを通して二重クラッド・ファイバー101に接続できることに注意されたい。ここに、信号光の伝達のために二色性ポンプ鏡502を使用したキャビティー設計を示す。二色性ポンプ鏡502は、ポンプ光を反射し信号光を透過させるタイプだが、信号光を反射しポンプ光を透過させる別タイプの二色性ポンプ鏡を使用することも可能である。レーザー出力を得るには、鏡102または106のどちらか一方を部分的反射鏡にしてもよい。

【0034】[実施例6] 実施例6としてのモードロック・レーザー装置では、図9に示したように、低複屈折二重クラッド・ファイバーを使用して、ファラデー回転鏡を使用せずにフェムト秒レーザーシステムを構成した。ファイバーと飽和吸収体の配置を最適化できるので、飽和吸収体118は鏡601に接触させても良い。この場合でも、鏡107に飽和吸収体118は含まれない。また、原理的には鏡502を取り除き、ポンプ光を単一の二色性偏光子（図示せず）を使用してキャビティーへ結合させることもできる。

【0035】図10に示したように、ファラデー回転鏡を取り除いた場合、チャープ・ファイバー・ブラッグ格子105を二重クラッド・ファイバー101に接続し得る。チャープ・ファイバー・ブラッグ格子105の分散を非常に低いレベルに抑えることによって、フェムト秒レーザーを形成し得ることに注目されたい。このレーザーの出力は偏光子117より得ることができる。この構成では所望の出力を得るために偏光子117において全ファイバーの偏光制御が行えるので非常に好ましい。しかし、リング・キャビティーの場合と同様に、線形の偏光変化がファイバー・キャビティー内で補償されないもので、システムの長期安定性は限定されたものとなる。このような安定性の問題は、短い（100psec未満）キャリア寿命の飽和吸収体を使用することによって解決し得る。また、キャビティー全体を高複屈折ファイバーで制作することによっても、安定性の問題を解決できる。リング・キャビティーの場合と同様に、全ファイバーの偏光軸が調整され、偏光子がファイバーの偏光軸の一つに対して調整されなければならない。レーザー光の出力は偏光保持カプラとして動作する偏光子117から取り出すことができる。

【0036】【実施例7】図11に示した実施例7としてのモードロック・レーザー装置のように、ピコ秒台（またはフェムト秒台）のレーザーシステムを構成するためには、ファラデー回転子を取り除いて、チャープ・ファイバー・ブラッグ格子701をファイバー101に直接形成し得る。飽和吸収体118をキャビティの一端（ミラー107）に接触させることで、システムの寸法を縮小させることができる。レーザー光の出力を取り出すために、鏡107と飽和吸収体118には部分的な反射性を与え得る。それとは別に、レーザー光の出力を取り出すために、ファイバー・カプラーを鏡107の前に挿入しても良い。

【0037】【本発明の効果】最後にまとめると、広帯域ダイオード・レーザー・アレイによって励起された二重クラッド希土類コーティング・ファイバー内におけるフェムト秒台およびピコ秒台パルスの発生が、今回初めて実現された。低価格なキャビティ部品を使用することによって、技術の優位性を大いに高めることができた。ここに幾つかの好ましい実施例を開示して説明したが、当業者であればそれ以外にも様々な実施態様が可能であることを容易に理解できるであろう。

【図面の簡単な説明】

【図1】 実施例1のクラッドポンプ式受動的モードロック・ファイバー・レーザーシステム（モードロック・レーザー装置）の構造を示すブロック図

【図2】 実施例1で発生するレーザパルスの特性を示す組図

(a) 半値全幅 (full width at half maximum) が560 fsec のパルスの自己相関軌跡を示すグラフ

(b) 半値全幅が560 fsec のパルスのスペクトルを示すグラフ

【図3】 実施例1で発生する他のレーザパルスの特性を示す組図

(a) 半値全幅が3 psec のパルスの自己相関軌跡を示すグラフ

(b) 半値全幅が3 psec のパルスのスペクトルを示すグラフ

【図4】 実施例1にチューニング素子と第二ブラッグ格子とを加えたクラッドポンプ式受動的モードロックファイバー・レーザーシステムの構造を示すブロック図

【図5】 実施例2の分散補償型キャビティを有するクラッドポンプ式受動的モードロックファイバー・レ

ザーシステムの構造を示すブロック図

【図6】 実施例3のクラッドポンプ式能動的モードロックファイバー・レーザーシステムの構造を示すブロック図

【図7】 実施例4のリング・キャビティを有するクラッドポンプ式能動的モードロックファイバー・レーザーシステムの構造を示すブロック図

【図8】 実施例5の二重バス構造を有するクラッドポンプ式モードロックファイバー・レーザーシステムを示すブロック図

【図9】 実施例6のクラッドポンプ式受動的モードロックファイバー・レーザーシステムの構造を示すブロック図

【図10】 実施例6を改変したクラッドポンプ式受動的モードロックファイバー・レーザーシステムの代案構造を示すブロック図

【図11】 実施例7のクラッドポンプ式受動的モードロックファイバー・レーザーシステムの構造を示すブロック図

【符号の説明】

101：二重クラッドEr/Ybファイバー（アクティブ・ファイバー）

102：二色鏡 103：ダイオード・レーザー・アレイ

104：モード・ストリッパー

105：チャープ・ファイバー・ブラッグ格子（CFBG, CFBG1）

106, 107：鏡 108, 109, 110, 111, 112：レンズ

113, 114：ファラデー回転子（FRM） 115：1/4波長板

116：1/2波長板 117：偏光子 118：飽和吸収体

119：第2チャープ・ファイバー・ブラッグ格子（CFBG2）

120：チューニング素子

201：標準単一モードファイバー、高陽性分散補償ファイバー

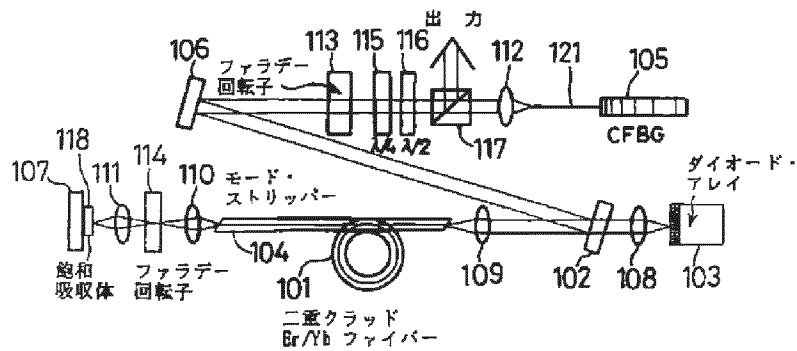
202：ファラデー回転子（FRM）

301, 302：変調器 303：鏡（出力カプラー）

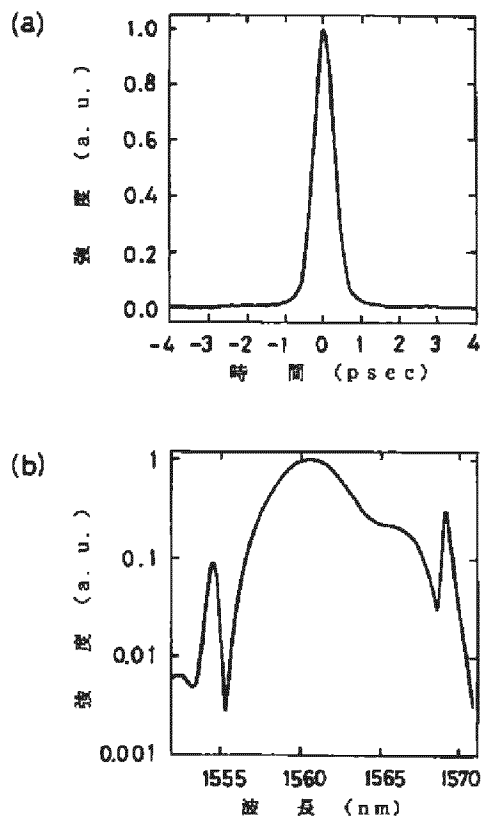
502：二色性ポンプ鏡 601：鏡

701：チャープ・ファイバー・ブラッグ格子（CFBG）

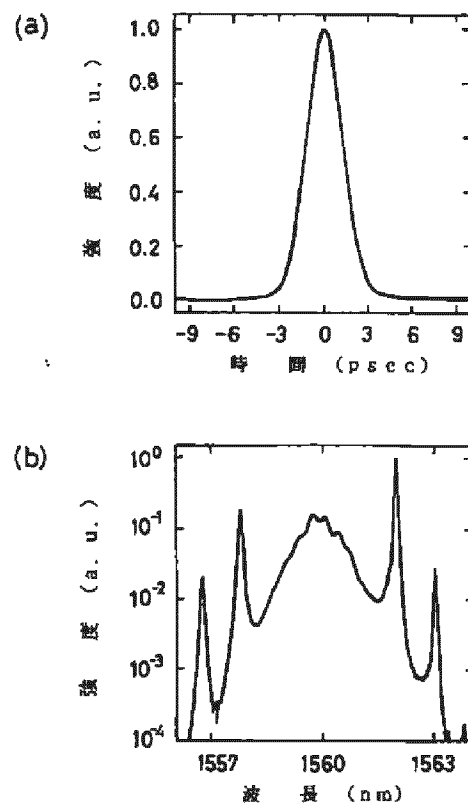
【図1】



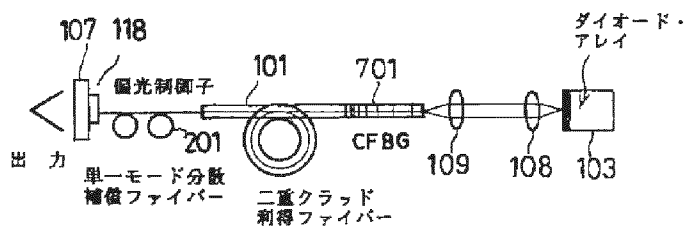
【図2】



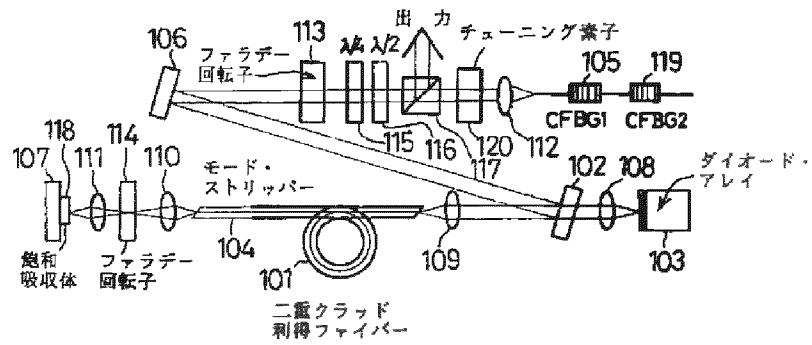
【図3】



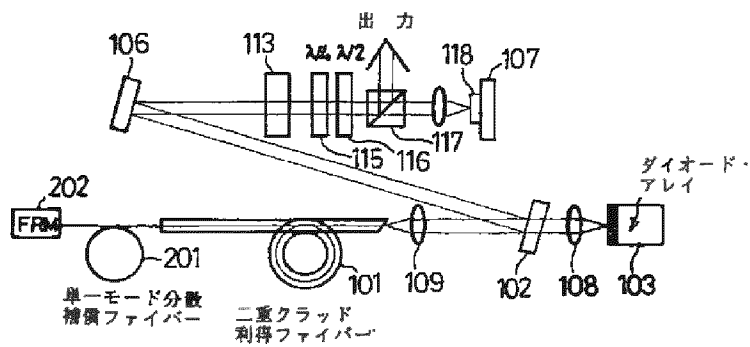
【図11】



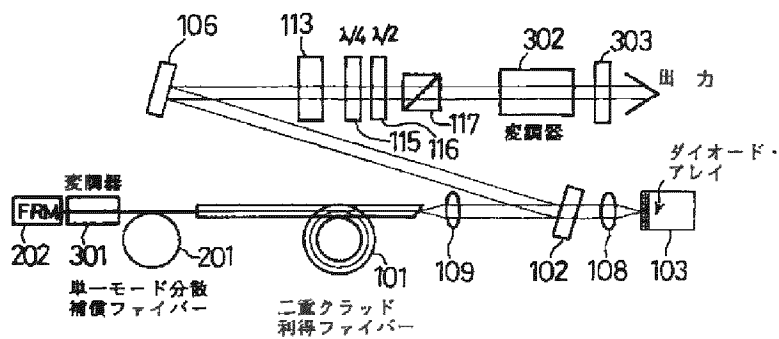
【図4】



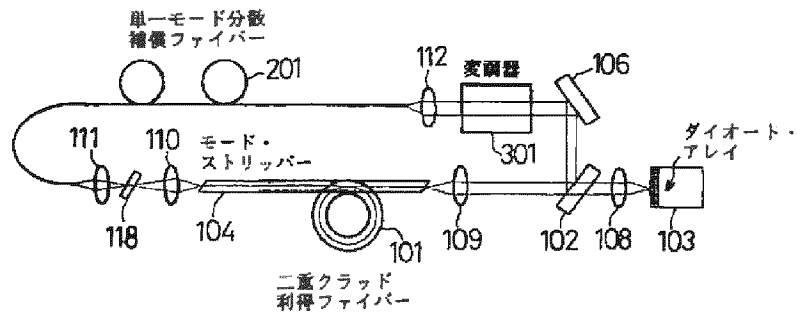
【図5】



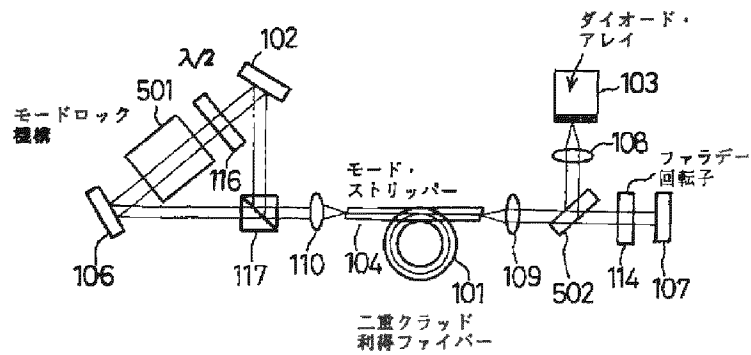
【図6】



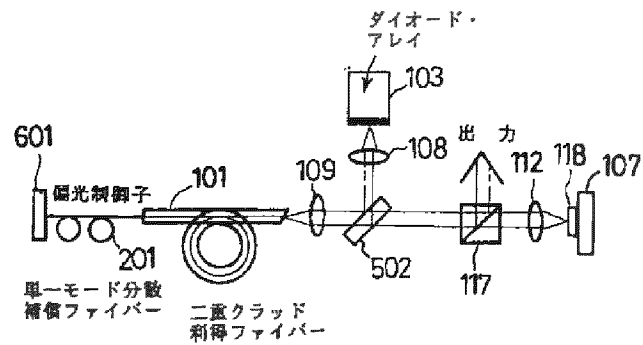
【図 7】



【図 8】



【図 9】



【図10】

